

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA ENERGETIKY

Návrh vzduchového a spalnového traktu pro plynofikovaný kotel

Design of air and flue gas duct for modified gas-fired boiler

Autor práce:
Vedoucí práce:

Bc. Lukáš Veverka
doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Veverka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh vzduchového a spalínového traktu pro plynofikovaný kotel**
Design of Air and Flue Gas Duct for Modified Gas-Fired Boiler
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Rozsah práce:

1. Vypracujte rešerši původního provedení kotle a kotle po plynofikaci, dopady plynofikace, použitelné vzduchové a spalínové ventilátory
2. Proveďte stechiometrické výpočty a výpočet účinnosti
3. Stanovte výrobní teplo kotle a množství spalovaného paliva
4. Navrhnete rekonstrukci vzduchového a spalínového traktu, vypracujte P&I schéma
5. Proveďte posouzení teploty spalin za kotlem včetně najíždění z hlediska nízkoteplotní koroze
6. Navrhnete parametry vzduchového a kouřového ventilátoru
7. Vypracujte projektovou studii vzduchového a spalínového traktu

Seznam doporučené odborné literatury:


Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skripta ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
ON 070417 Tepelný výpočet parných kotlov, 1984.
Vilimec, L.; Josiek, J.: Materiály a pevnostní dimenzování částí parních generátorů, skripta VŠB TU Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2512-0.
Vilimec, L.: Řízení a regulace energetických zařízení, skripta VŠB TU Ostrava, 20008. ISBN 978-80-248-1853-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry

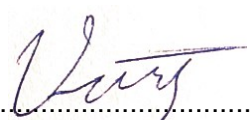



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

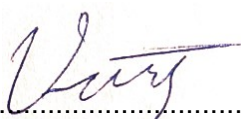
V Ostravě : 20.5.2019


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2019



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Veverka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nošovice 131
739 51
Nošovice

Anotace diplomové práce

VEVERKA L. Návrh vzduchového a spalínového traktu pro plynofikovaný kotel. Diplomová práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2019. X s. Vedoucí práce: Vilímeček, L.

V diplomové práci se zabývám návrhem nového vzduchového a spalínového traktu z bývalého uhelného (nyní plynofikovaného) kotle v závodu Biocel Paskov. V úvodu se věnuji rešerši současného stavu kotle a srovnání se stavem před plynofikací. Následuje stechiometrie spalovaného paliva a množství a parametry spalín na výstupu z kotle. V další části se zabývám návrhem a tlakovými ztrátami nového spalínového kanálu. Na závěr navrhuji a popísuji nový ventilátor spalín.

Annotation of diploma thesis

VEVERKA L. Design of air and flue gas duct for modified gas-fired boiler. Diploma Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2019. X p. Supervisor: Vilimec, L.

In diploma thesis i deal with design of new air and flue gas duct for boiler originally for black coal combustion (now modified for gas) in Biocel Paskov. In the begining I deal with research about present state of boiler and comparing it to state before modification for gas combustion. Followed by stoichiometry of combusted fuel and volume and other parameters of flue at boiler outlet. In next part I deal with design and pressure losses of new flue duct. At the end I desing and describe new flue ventilator.

Obsah

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE	5
ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS.....	5
OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
1 ÚVOD.....	10
1.1 Lenzing Biocel Paskov.....	10
1.2 Popis kotle.....	11
1.3 Provoz kotle.....	11
1.1 Technické hodnoty kotle	12
1.2 Plynové zařízení kotle.....	14
1.3 Původní provedení	14
1.4 Vzduchové a spalínové ventilátory.....	14
1.4.1 Primární ventilátory.....	15
1.4.2 Spalínové ventilátory	16
2 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY	17
2.1 Složení zemního plynu	17
2.2 Složení spalin	17
2.2.1 Objem kyslíku pro spalování.....	17
2.2.2 Minimální objem suchého vzduchu	18
2.2.3 Přebytek vzduchu:	18
2.2.4 Součinitel vlhkosti	18
2.2.5 Minimální objem vlhkého vzduchu	18
2.2.6 Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu	18
2.2.7 Skutečný objem vlhkého vzduchu.....	19
2.2.8 Minimální objem oxidu uhličitého ve spalinách	19
2.2.9 Množství dusíku ve spalinách	19
2.2.10 Minimální objem suchých spalin	20
2.2.11 Objem vodní páry ve spalinách.....	20
2.2.12 Minimální objem vlhkých spalin	20
2.2.13 Skutečný objem vlhkých spalin	20
2.3 Koncentrace spalin	21
2.3.1 Stechiometrická koncentrace spalin.....	21
2.3.2 Množství oxidu uhličitého ve skutečných spalinách	21
2.3.3 Množství dusíku ve skutečných spalinách	21
2.3.4 Množství kyslíku ve skutečných spalinách	22

2.3.5	Množství vodní páry ve skutečných spalínách	22
2.3.6	Skutečná koncentrace spalin	22
2.4	<i>Hustota vzduchu a spalin</i>	23
2.4.1	Hustota vzduchu	23
2.4.2	Hustota spalin stechiometrických	24
2.4.3	Hustota skutečných spalin	24
2.5	<i>Entalpie vzduchu a spalin</i>	25
2.5.1	Měrné entalpie složek	25
2.5.2	Entalpie spalin	25
2.6	<i>Tepelné kapacity spalin</i>	25
2.6.1	Kapacity složek	26
2.6.2	Kapacita spalin	26
2.7	<i>Účinnost</i>	26
2.7.1	Ztráty chemickým nedopalem	26
2.7.2	Ztráty sáláním a vedením tepla do okolí	26
2.7.3	Ztráta citelným teplem spalin – komínová	27
2.7.4	Účinnost kotle	27
2.8	<i>Výrobní teplo a množství paliva</i>	27
2.8.1	Entalpie páry a vody	27
2.8.2	Výrobní teplo	27
3	NÁVRH REKONSTRUKCE SPALINOVÉHO TRAKTU	28
3.1	<i>Návrh spalinového kanálu</i>	28
3.1.1	Výpočtové měrné množství spalin při jmenovitém výkonu kotle	28
3.1.2	Parametry spalin pro výpočet tlakových ztrát a návrh ventilátoru.	28
3.2	<i>Aerodynamický výpočet spalinového traktu</i>	29
3.2.1	Množství spalovaného plynu při jm. výkonu	29
3.2.2	Výpočtové skutečné množství spalin	29
3.2.3	Efektivní množství paliva	29
3.2.4	Určení hydraulického průměru	29
3.2.5	Reynoldsovo číslo	29
3.2.6	Součinitel	29
3.2.7	Tlaková ztráta třením spalin o stěny výtlačného potrubí	29
3.2.8	Místní ztráty výtlačného potrubí	30
3.2.9	Celková tlaková ztráta spalinového potrubí na výtlačku ventilátoru ..	30
3.2.10	Tlaková ztráta třením spalin o stěny sacího	30
3.2.11	Místní ztráty sacího potrubí	30
3.2.12	Celková tlaková ztráta spalinového potrubí na sání ventilátoru	30

3.2.13 Celková tlaková ztráta spalínového potrubí.....	30
4 PARAMETRY KOUŘOVÉHO VENTILÁTORU	31
4.1 Motory	31
4.2 Svorky	32
4.3 Vibrace	32
4.4 Hodnoty pro návrh ventilátoru.....	34
4.5 Vzduchový ventilátor	34
4.6 Kouřový ventilátor.....	35
4.7 Specifikace navržených ventilátorů.....	36
5 POSOUZENÍ TEPLoty SPALIN ZA KOTLEM	37
5.1 Nízkoteplotní koroze	38
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	40
SEZNAM TABULEK	41
SEZNAM PŘÍLOH.....	41
Poděkování	42

Seznam použitých značek a symbolů

A ... [-]

1 Úvod

Lenzing Biocel Paskov

Biocel je akciovou společností sídlící v Paskově u Frýdku-Místku. Založena byla roku 1983, kdy byla po čtyřech letech dokončena výstavba celulózky. Vyráběným produktem byla buničina pro výrobu papíru. V roce 1992 byla privatizována a v roce 2001 se stala členem skupiny Heinzl což je evropský výrobce buničiny a papíru. Většinový podíl však v roce 2010 odkoupila Skupina Lenzing, která v následujícím roce započala přestavbu závodu, v jejímž důsledku došlo ke změně výroby papírenské buničiny na buničinu viskózovou, používanou k výrobě vláken. Tím došlo také k zastavení výroby krmných kvasnic, vedlejšího produktu výroby papírenské buničiny. Zároveň došlo k ukončení výroby energie z uhlí a přestavení uhelného kotle na kotel plynový. V roce 2015 byla zcela dokončena přestavba a roční produkce viskózové buničiny, bělené zcela bez chloru, byla navýšena na 270 tisíc tun. Téměř tři čtvrtiny dřevní suroviny pochází z České republiky, jedná se o smrkové dřevo.

Lenzing Biocel Paskov a.s. je v současnosti z pohledu elektřiny a tepla téměř zcela energeticky soběstačný. Potřebná energie pochází z biomasy ze dřeva. Elektřina, která se nespotřebuje při provozu závodu, se dodává do distribuční soustavy.



Obrázek. č. 1.1: Biocel Paskov

Popis kotle

Parní kotel K2 ČKD Ignifluid po přestavbě je určen pro spalování zemního plynu. Provádí jej 4 ks plynových hořáků. Jedná se o kotel jedno-bubnový, s přirozenou cirkulací. Výhřevné plochy jsou umístěny ve dvou tazích a v samostatně umístěném ohříváku vzduchu. Ohniště je chlazeno kotlovými trubkami s šamotovou vyzdívkou a tepelnou izolací. Povrch kotle je kryt oplechováním. V horní části ohniště je umístěna soustava varných šotů a přehřívák páry. Kotel je vybaven vstřikovou regulací teploty přehřáté páry, zařazenou mezi první a druhý díl přehříváku. Vstřikuje se napájecí voda odebíraná z napájecího potrubí před napájecí hlavou. Ve druhém tahu je vestavěn trubkový ohřívák vody.

Trubkový a parní ohřívák sekundárního vzduchu jsou umístěny mimo blok kotle nad vzduchovým ventilátorem. Ventilátor vzduchu je umístěn v samostatném obezděném přístavku. Sací potrubí ventilátoru je opatřeno nasávací hlavicí s možností sání vzduchu z kotelny nebo z venkovního prostoru, případně kombinací. V sacím potrubí je rovněž umístěn tlumič hluku.

Výtlačné vzduchovody jsou rozvětveny na vzduchovody studeného primárního vzduchu (bývalý uhelný provoz), které jsou vedeny podél kotle do jednotlivých zón roštu, a na vzduchovody sekundárního vzduchu, vedoucí nejprve k ohřívákům vzduchu a z nich do hubic sekundárního vzduchu po stranách kotle. Ze sekundárních vzduchovodů je vzduch zaveden též do plynových hořáků. Součástí kotle je rovněž zazdívka a tepelná izolace provedená ve spalovací komoře a ve druhém tahu ze šamotových desek a tvárnic, na které je těžká zazdívka. Dále jsou tepelně izolovány všechny díly, jejichž povrchová teplota je vyšší než 50°C.

Zemní plyn je k hořákům přiváděn z regulačních ramp napojených na průmyslový plynovod podniku.

Provoz kotle

Řízení se provádí na mikroprocesorovém zařízení Damatic DNA. Výkon kotle se řídí tak, aby nebyl ani trvale překračován maximální výkon -60 t/h ani trvale podkročován minimální výkon - 20 t/h. Překroční maximálního výkonu 60 t/h je povoleno o 10% z této hodnoty. Doba setrvání na takto zvýšeném výkonu je jedna hodina v průměru jedné směny, maximálně 2 hodiny za 24 hodin. Stejně hodnoty platí pro podkročení minimálního výkonu 20 t/h, V zásadě platí pravidlo o vyloučení rychlých změn ve výkonu a tlaku kotle. Během provozu je nutné vykonávat pravidelné obchůzky kotle a celého navazujícího zařízení a při nich sledovat a kontrolovat zejména teploty ložisek ventilátorů, čerpadel, těsnosti spojů a správný chod všech zařízení. Před vstupem do komína je instalováno kontinuální měření emisí CO, SO₂ a NO_x.

Emisní limity provozu:

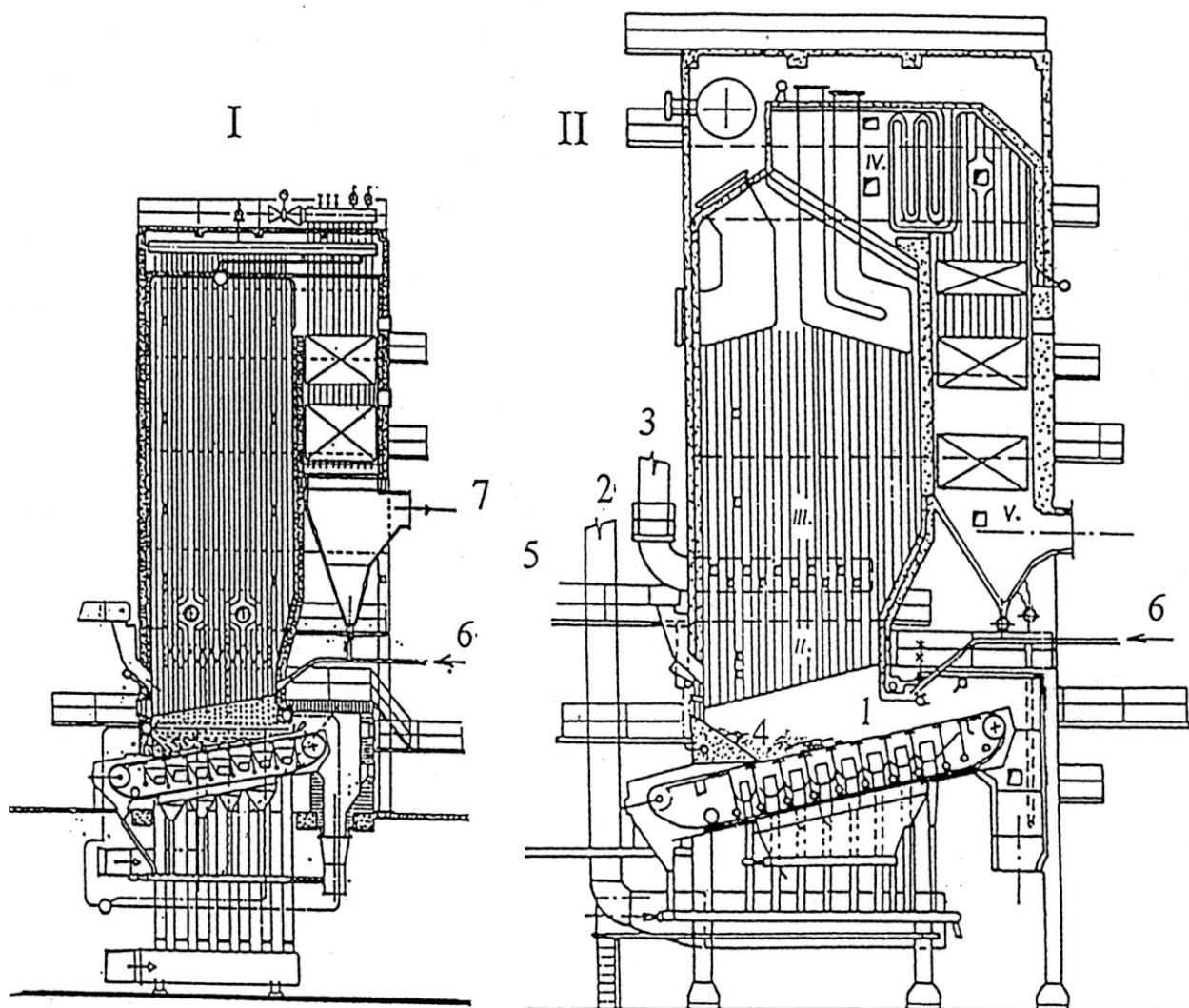
SO ₂	max. 35 mg/Nm ³
NO _x	max. 200 mg/Nm ³ .
CO	max. 100 mg/Nm ³

Parní kotel musí být ihned odstaven z provozu při ztrátě vody ve vodozncích, při vzniku takových trhlin a netěsností tlakového systému kotle, že ani při zvýšeném napájení nelze udržet nejnižší stav vody v kotli, při závažné poruše zazdívky nebo při nepřipustném ohřátí nosné konstrukce kotle, při výbuchu nespálených plynů v topeništi, při němž mohl být poškozen tlakový systém kotle, při vzniku nebezpečných deformací na stěnách tlakového celku kotle. Dále pak ve všech případech, kdy je stavem kotelního zařízení ohrožena bezpečnost lidí a okolí, nastanou-li v kotelně, případně na velínu takové poměry, že nelze zajistit spolehlivou obsluhu kotle. Nakonec také při překročení nejvýše dovolených parametrů (mezních hranic) do doby delší, než je uvedeno v provozních předpisech výrobce nebo dojde-li k výpadku napájecích čerpadel, resp. poruše napájecího potrubí, že nelze kotel dostatečně napájet, tj. nelze-li udržet nejnižší přípustnou hladinu vody v kotli.

1.1 Technické hodnoty kotle

Zkoumaný Parní kotel K2 byl vyroben roku 1982 a přestavěn na zemní plyn v roce 2013.

Jmenovitý výkon parního kotle:	60 t/h – při provozu plyn hořáku
Min. výkon parního kotle:	20 t/h na plyn.
Jmenovitý tlak páry:	8,45 Mpa
Nejvyšší tlak páry:	8,9 MPa
Zkušební přetlak kotle:	12,1 MPa
Jmenovitá teplota páry:	485 °C
Jmenovitá teplota napájecí vody:	140 ± 5 °C
Typ hořáků:	RAZ EG 1000 a RAZ EG 1500
Počet kusů:	2 + 2
Hmotnost hořáku:	cca 250 kg, resp. cca 285 kg
Druh topného plynu:	zemní plyn
Přetlak plynu pod regul.:	0,105 MPa
Přetlak plynu před hořákem:	25 - 35 kPa
Rozsah výkon hořáků:	0,97 – 11,61 MW, resp. 1,63 – 19,77 MW



Obr.č. 1.2 Schéma kotle typu Ignifluid

Plynové zařízení kotle

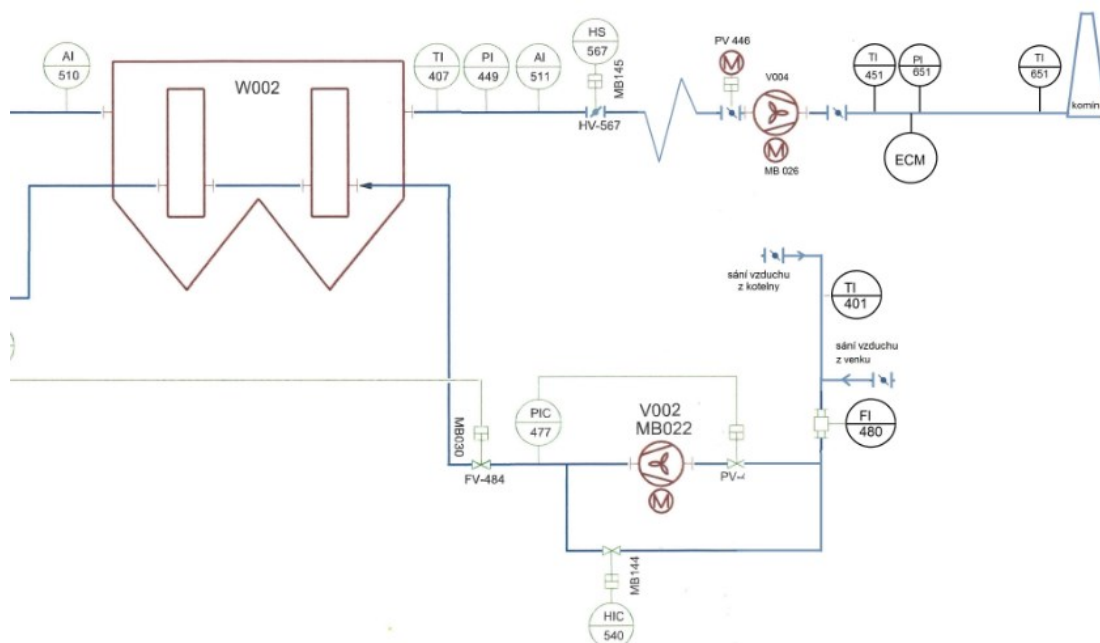
Spalování plynu zajišťují dvě dvojice hořáků Ray EG 1500 a EG 1000 o výkonech 1628-19797 kW resp. 965-11628 kW s plynulou regulací. Výhřevnost dodávaného zemního plynu je v průměru 34-36 MJ/Nm³, 0 °C, 101,3 kPa, obsah CH₄ - 94 %, hustota 0,7 kg/m³, 20 °C C, 101,3 kPa, rosný bod vody 6,6 °C, rosný bod uhlovodíků 2,47 °C, obsah sirovodíku 0,47 mg/m³ a celková síra 1,66 mg/m³.

Původní provedení

Původně byl kotel od roku 1982 provozován jako uhelný. Jeho jmenovitý výkon tehdy dosahoval hodnoty 100 tun/hod. V důsledku plynofikace tedy došlo k poklesu jeho výkonu. Hodnoty tlaku páry byly ovlivněny jen minimálně, jelikož oproti současným 8,45 MPa pracoval kotel v uhelném provedení s tlakem 8,6 MPa. Teplota páry zůstala stejná a sice 485°C

Vzduchové a spalínové ventilátory

Současné ventilátory, jsou v závodu od jeho založení v roce 1982. Dodala je německá firma WAAGNER-BIRÓ



Obrázek č.1.3: část schématu K2 vzduch se stávajícími ventilátory

Primární ventilátory

Typ: Radiální vzduchové dmychadlo C16, 8-LM-d

Výkon: 137 790 m³/h

122 400 m³/h (při normálních podmínkách)

Teplota media: 20°C

Hustota: 1,1655 kg/m³

Přetlak: 6119/6870 Pa

Příkon na hřídeli: 305 kW

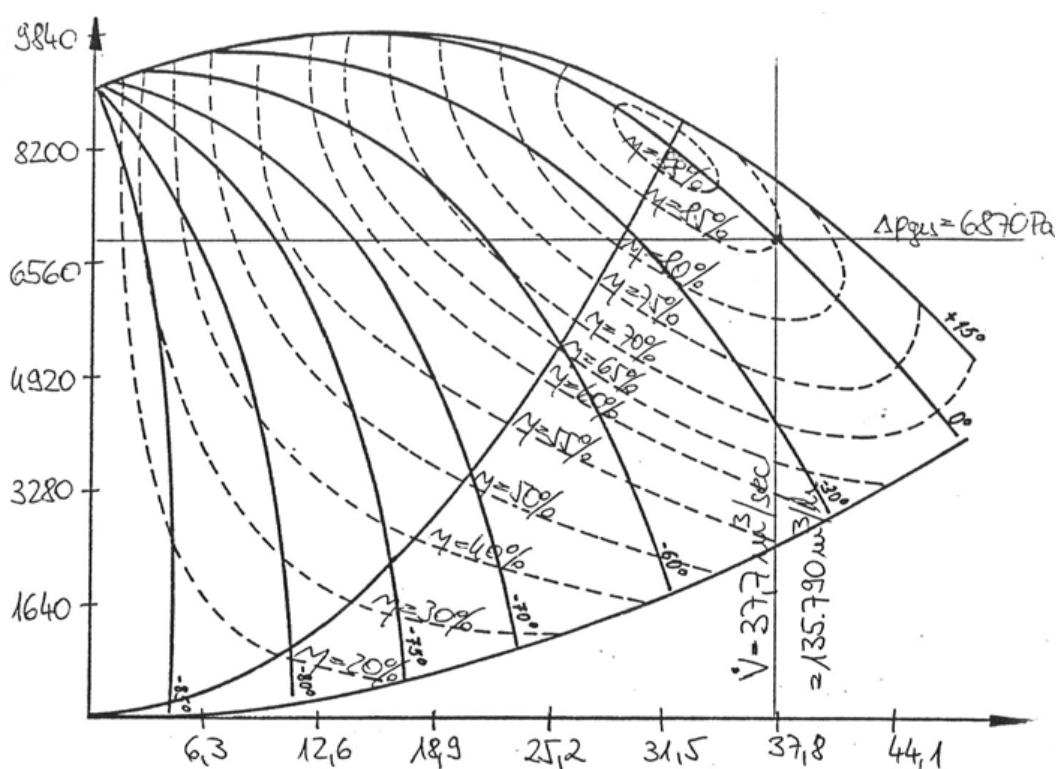
Výkon motoru: 400 kW

Otáčky motoru: 1480 min⁻¹

Typ pohonu: Elektromotor s pružnou vazbou

Typ uložení: Ložiskové pouzdro FAG SN 528 R

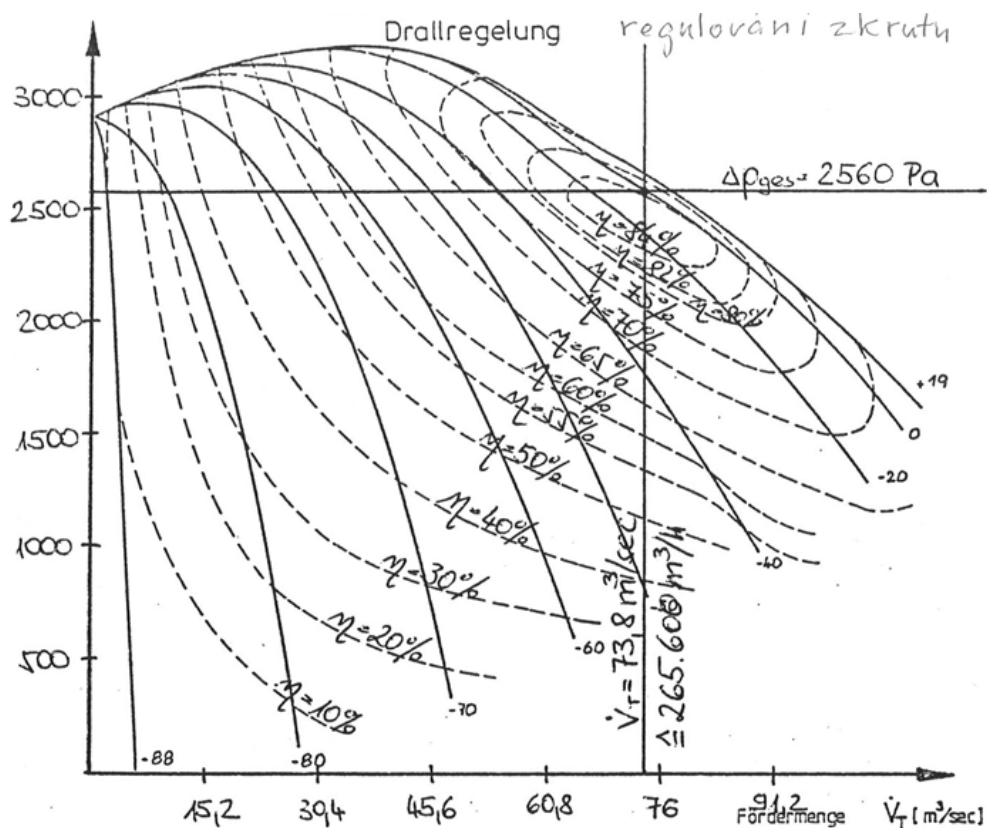
Mazání: Regulátor oleje



Obrázek č.1.4: Charakteristiky primárního ventilátoru

Spalinové ventilátory

Typ:	Radiální dmychadlo spalin WB-S-II-LM-d 1888/1190
Výkon:	265 600 m ³ /h 162 000 m ³ /h (při normálních podmínkách)
Teplota media:	160 °C
Hustota:	0,805 kg/m ³
Přetlak:	2575/2845 Pa
Příkon na hřídeli:	250 kW
Výkon motoru:	250 kW
Otáčky motoru:	740 min ⁻¹
Typ pohonu:	Elektromotor s pružnou vazbou
Typ uložení:	Ložiskové pouzdro FAG LOE 226
Mazání:	Ponorné mazání



Obrázek č. 1.5: Charakteristiky spalinového ventilátoru

2 Stechiometrické výpočty

Složení zemního plynu

Metan CH ₄	96,529	%
Etan C ₂ H ₆	2,337	%
Propan C ₃ H ₈	0,243	%
Butan C ₄ H ₁₀	0,088	%
Pentan C ₅ H ₁₂	0,011	%
C ₆ +	0,011	%
CO ₂	0,271	%
N ₂	0,509	%
α	1,15	-
Vlhkost 70%	1,016	-
Výhřevnost	35,88	MJ/Nm ³

Použity údaje zemního plynu od společnosti Innogy, od které je spalovaný zemní plyn odebírán.

Složení spalin

Objem kyslíku pro spalování

$$O_{O_2,min} = 2 \cdot o_{CH_4} + 3,5 \cdot o_{C_2H_6} + 5 \cdot o_{C_3H_8} + 7,5 \cdot o_{C_4H_{10}} + 9 \cdot o_{C_5H_{12}} + 10,5 \cdot o_{C_{6+}H_{14+}} \quad (1)$$

$$O_{O_2,min} = 2 \cdot 0,9653 + 3,5 \cdot 0,0234 + 5 \cdot 0,0024 + 7,5 \cdot 0,0009 + 9 \cdot 0,0001 + 10,5 \cdot 0,0001$$

$$O_{O_2,min} = 2,0323 \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

- o_{CH_4} ... podíl metanu v palivu [%]
- $o_{C_2H_6}$... podíl ethanu v palivu [%]
- $o_{C_3H_8}$... podíl propanu v palivu [%]
- $o_{C_4H_{10}}$... podíl butanu v palivu [%]
- $o_{C_5H_{12}}$... podíl pentanu v palivu [%]
- $o_{C_{6+}H_{14+}}$... podíl vyšších uhlovodíků v palivu [%]

Minimální objem suchého vzduchu

$$O_{VS,min} = \frac{O_{O_2,min}}{0,21} \quad (2)$$

$$O_{VS,min} = \frac{2,0323}{0,21}$$

$$O_{VS,min} = 9,6775 \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

- $O_{O_2,min}$... objem kyslíku pro spalování [$m_{N,O_2}^3/m_{N,pal}^3$]

Přebytek vzduchu:

Hodnotu přebytku vzduchu jsem uvažoval 1,15, která odpovídá provozním zkušenostem.

$$\alpha = 1,15$$

Součinitel vlhkosti

Pro konstrukční výpočty lze uvažovat relativní hodnotu součinitele vlhkosti $\chi = 1,016$, která odpovídá přibližně relativní vlhkosti spalovacího vzduchu $\varphi = 70 \%$ a teplotě $t = 20^\circ C$.

Minimální objem vlhkého vzduchu

$$O_{VV,min} = O_{VS,min} \cdot \chi = 9,6775 \cdot 1,0160 = 9,8324 \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (3)$$

- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- χ ... relativní vlhkost [–]

Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu

$$O_{H_2O}^V = O_{VV,min} - O_{VS,min} = 9,8324 - 9,6775 = 0,1548 \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (4)$$

- $O_{VV,min}$... minimální objem vlhkého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]

Skutečný objem vlhkého vzduchu

$$O_{VV} = O_{VV,min} \cdot \alpha = 9,8324 \cdot 1,15 = \mathbf{11,3072} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (5)$$

- $O_{VV,min}$... minimální objem vlhkého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- α ... přebytek spalovacího vzduchu [–]

Minimální objem oxidu uhličitého ve spalinách

$$O_{CO_2} = o_{CO_2} + 0,994 \cdot (o_{CH_4} + 2 \cdot o_{C_2H_6} + 3 \cdot o_{C_3H_8} + 4 \cdot o_{C_4H_{10}} + 5 \cdot o_{C_5H_{12}} + 6 \cdot o_{C_{6+H_{14+}}}) + 0,0003 \cdot O_{VS,min} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} O_{CO_2} &= 0,00271 \\ &+ 0,994 \cdot (0,9653 + 2 \cdot 0,0234 + 3 \cdot 0,0024 + 4 \cdot 0,0009 + 5 \cdot 0,0001 + 6 \cdot 0,0001) \\ &+ 0,0003 \cdot 9,6775 \\ O_{CO_2} &= \mathbf{1,0235} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3} \end{aligned}$$

- o_{CO_2} ... podíl oxidu uhličitého v palivu [%]
- o_{CH_4} ... podíl metanu v palivu [%]
- $o_{C_2H_6}$... podíl ethanu v palivu [%]
- $o_{C_3H_8}$... podíl propanu v palivu [%]
- $o_{C_4H_{10}}$... podíl butanu v palivu [%]
- $o_{C_5H_{12}}$... podíl pentanu v palivu [%]
- $o_{C_{6+H_{14+}}}$... podíl vyšších uhlovodíků v palivu [%]
- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]

Množství dusíku ve spalinách

$$O_{N_2} = o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VS,min} = 0,0051 + 0,7805 \cdot 9,6775 = \mathbf{7,5584} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (7)$$

$$O_{N_2} = o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VS,min} = 0,0051 + 0,7805 \cdot 9,6775 = \mathbf{7,5584} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

- o_{N_2} ... podíl dusíku v palivu [%]
- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]

Minimální objem suchých spalin

$$O_{SS,min} = O_{CO_2} + O_{N_2} = 1,0235 + 7,5584 = \mathbf{8,5819} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (8)$$

- O_{CO_2} ... množství oxidu uhličitého ve spalinách [$m_{N,CO_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- O_{N_2} ... množství dusíku ve spalinách [$m_{N,N_2}^3/m_{N,pal}^3$]

Objem vodní páry ve spalinách

$$\begin{aligned} O_{H_2O}^S &= (2 \cdot o_{CH_4} + 3 \cdot o_{C_2H_6} + 4 \cdot o_{C_3H_8} + 5 \cdot o_{C_4H_{10}} + 6 \cdot o_{C_5H_{12}} + 7 \cdot o_{C_6+H_{14+}}) + O_{H_2O}^V \\ O_{H_2O}^S &= (2 \cdot o_{CH_4} + 3 \cdot o_{C_2H_6} + 4 \cdot o_{C_3H_8} + 5 \cdot o_{C_4H_{10}} + 6 \cdot o_{C_5H_{12}} + 7 \cdot o_{C_6+H_{14+}}) + O_{H_2O}^V \\ O_{H_2O}^S &= (2 \cdot 0,9653 + 3 \cdot 0,0234 + 4 \cdot 0,0024 + 5 \cdot 0,0009 + 6 \cdot 0,0001 + 7 \cdot 0,0001) \\ &\quad + 0,1548 = \mathbf{2,1711} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3} \end{aligned} \quad (9)$$

- o_{CH_4} ... podíl metanu v palivu [%]
- $o_{C_2H_6}$... podíl ethanu v palivu [%]
- $o_{C_3H_8}$... podíl propanu v palivu [%]
- $o_{C_4H_{10}}$... podíl butanu v palivu [%]
- $o_{C_5H_{12}}$... podíl pentanu v palivu [%]
- $O_{H_2O}^V$... objem vodní páry ve vlhkém vzduchu [$m_{N,H_2O}^3/m_{N,pal}^3$]

Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{SV,min} = O_{SS,min} + O_{H_2O}^S = 8,5819 + 2,1711 = \mathbf{10,7530} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (10)$$

- $O_{SS,min}$... minimální objem suchých spalin [$m_{N,sp}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{H_2O}^S$... objem vodní páry ve spalinách [$m_{N,H_2O}^3/m_{N,pal}^3$]

Skutečný objem vlhkých spalin

$$O_{SV} = O_{SV,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV,min} = 10,7530 + (1,15 - 1) \cdot 9,8324 \quad (11)$$

$$O_{SV} = \mathbf{12,2279} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

- $O_{SV,min}$... minimální objem vlhkých spalin [$m_{N,sp}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{VV,min}$... minimální objem vlhkého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]

- α ... přebytek spalovacího vzduchu [–]

Koncentrace spalin

Stechiometrická koncentrace spalin

$$x_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV,min}} \cdot 100 = \frac{1,0235}{10,7530} \cdot 100 = 9,5185 \% \quad (12)$$

$$x_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SV,min}} \cdot 100 = \frac{7,5584}{10,7530} \cdot 100 = 70,2911 \% \quad (13)$$

$$x_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S}{O_{SV,min}} \cdot 100 = \frac{2,1711}{10,7530} \cdot 100 = 20,1905 \% \quad (14)$$

- O_{CO_2} ... množství oxidu uhličitého ve spalinách [$m_{N,CO_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- O_{N_2} ... množství dusíku ve spalinách [$m_{N,N_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{H_2O}^S$... objem vodní páry ve spalinách [$m_{N,H_2O}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{SV,min}$... minimální objem vlhkých spalin [$m_{N,sp}^3/m_{N,pal}^3$]

Množství oxidu uhličitého ve skutečných spalinách

$$O_{CO_2,\alpha} = o_{CO_2} + 0,994 \cdot (o_{CH_4} + 2 \cdot o_{C_2H_6} + 3 \cdot o_{C_3H_8} + 4 \cdot o_{C_4H_{10}} + 5 \cdot o_{C_5H_{12}} + 6 \cdot o_{C_6+H_{14+}}) + 0,0003 \cdot O_{VS,min} \cdot \alpha \quad (15)$$

$$O_{CO_2,\alpha} = 0,00271 + 0,994 \cdot (0,9653 + 2 \cdot 0,0234 + 3 \cdot 0,0024 + 4 \cdot 0,0009 + 5 \cdot 0,0001 + 6 \cdot 0,0001) + 0,0003 \cdot 9,6775 \cdot 1,15$$

$$O_{CO_2,\alpha} = 1,0240 \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

- o_{CH_4} ... podíl metanu v palivu [%]
- $o_{C_2H_6}$... podíl ethanu v palivu [%]
- $o_{C_3H_8}$... podíl propanu v palivu [%]
- $o_{C_4H_{10}}$... podíl butanu v palivu [%]
- $o_{C_5H_{12}}$... podíl pentanu v palivu [%]
- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- α ... přebytek spalovacího vzduchu [–]

Množství dusíku ve skutečných spalinách

$$O_{N_2,\alpha} = o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VS,min} \cdot \alpha = 0,0051 + 0,7805 \cdot 9,6775 \cdot 1,15 \quad (16)$$

$$O_{N_2,\alpha} = 8,6914 \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství kyslíku ve skutečných spalínách

$$O_{O_2,\alpha} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS,min} = 0,21 \cdot (1,15 - 1) \cdot 9,6775 = 0,3048 \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (17)$$

- α ... přebytek spalovacího vzduchu [–]
- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- O_{N_2} ... množství dusíku ve spalínách [$m_{N,N_2}^3/m_{N,pal}^3$]

Množství vodní páry ve skutečných spalínách

$$O_{H_2O,\alpha}^S = (2 \cdot o_{CH_4} + 3 \cdot o_{C_2H_6} + 4 \cdot o_{C_3H_8} + 5 \cdot o_{C_4H_{10}} + 6 \cdot o_{C_5H_{12}} + 7 \cdot o_{C_6H_{14+}}) + O_{VS,min} \cdot \alpha \cdot (\chi - 1) \quad (18)$$

$$O_{H_2O,\alpha}^S = (2 \cdot 0,9653 + 3 \cdot 0,0234 + 4 \cdot 0,0024 + 5 \cdot 0,0009 + 6 \cdot 0,0001 + 7 \cdot 0,0001) + 9,6775 \cdot 1,15 \cdot (1,016 - 1) = 2,1943 \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

- o_{CH_4} ... podíl metanu v palivu [%]
- $o_{C_2H_6}$... podíl ethanu v palivu [%]
- $o_{C_3H_8}$... podíl propanu v palivu [%]
- $o_{C_4H_{10}}$... podíl butanu v palivu [%]
- $o_{C_5H_{12}}$... podíl pentanu v palivu [%]
- α ... přebytek spalovacího vzduchu [–]
- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- χ ... relativní vlhkost [–]

Skutečná koncentrace spalin

$$x_{CO_2,\alpha} = \frac{O_{CO_2,\alpha}}{O_{SV}} \cdot 100 = \frac{1,0240}{12,2279} \cdot 100 = 8,37 \quad (19)$$

$$x_{N_2,\alpha} = \frac{O_{N_2,\alpha}}{O_{SV}} \cdot 100 = \frac{8,6914}{12,2279} \cdot 100 = 71,08 \% \quad (20)$$

$$x_{H_2O,\alpha}^S = \frac{O_{H_2O,\alpha}^S}{O_{SV}} \cdot 100 = \frac{2,1943}{12,2279} \cdot 100 = 17,95 \% \quad (21)$$

$$x_{O_2,\alpha} = \frac{O_{O_2,\alpha}}{O_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,3048}{12,2279} \cdot 100 = 2,49 \% \quad (22)$$

- $O_{CO_2,\alpha}$... množství oxidu uhličitého ve skutečných spalínách [$m_{N,CO_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{N_2,\alpha}$... množství dusíku ve skutečných spalínách [$m_{N,N_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{H_2O,\alpha}^S$... objem vodní páry ve skutečných spalínách [$m_{N,H_2O}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{O_2,\alpha}$... množství kyslíku ve skutečných spalínách [$m_{N,O_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- O_{SV} ... skutečný objem vlhkých spalín [$m_{N,sp}^3/m_{N,pal}^3$]

Hustota vzduchu a spalín

Z tabulky 4-6 z literatury [2] počítám s těmito hodnotami.

$$\rho_{VS} = 1,2928 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

$$\rho_{CO_2} = 1,9768 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

$$\rho_{N_2} = 1,2505 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

$$\rho_{H_2O} = 0,8058 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

$$\rho_{O_2} = 1,4289 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

Plyn	M_i [kg/kmol]	ρ_i [kg/m ³]	v_i [m ³ /kg]	R_i [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Ar	39,944	1,78385	0,560585	208,14
H ₂	2,016	0,089867	11,127555	4124,0
O ₂	32,00	1,42891	0,699835	259,8
N ₂	28,01	1,25047	0,79967	296,8
CO	28,00	1,2506	0,799616	296,9
suchý vzduch	28,96	1,29279	0,773521	287,12
vodní pára	18,016	0,8058	1,241003	461,5
CO ₂	44,010	1,9768	0,505868	188,9
SO ₂	64,06	2,9262	0,341740	129,8
NH ₃	17,034	0,761	1,314060	488,0
CH ₄	16,032	0,7160	1,396648	518,6

Obrázek č.

Hustota vzduchu

$$\rho_{VV} = \frac{O_{VS,min} \cdot \rho_{VS} + (\chi - 1) \cdot O_{VS,min} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{VV,min}} \quad (23)$$

$$\rho_{VV} = \frac{9,6775 \cdot 1,2928 + (1,016 - 1) \cdot 9,6775 \cdot 0,8058}{9,8324} = 1,2851 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

- $O_{VS,min}$... minimální objem suchého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- ρ_{VS} ... hustota suchého vzduchu [$kg/m_{N,pal}^3$]
- χ ... relativní vlhkost [–]
- ρ_{H_2O} ... hustota vodní páry [$kg/m_{N,pal}^3$]
- $O_{VV,min}$... minimální objem vlhkého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]

Hustota spalin stechiometrických

$$\rho_{SV,min} = \frac{O_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + O_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + O_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{SV,min}} \quad (24)$$

$$\rho_{SV,min} = \frac{1,0235 \cdot 1,9768 + 7,5584 \cdot 1,2505 + 2,1711 \cdot 0,8058}{O_{SV,min}}$$

$$\rho_{SV,min} = 1,2298 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

- ρ_{CO_2} ... hustota oxidu uhličitého [$kg/m_{N,pal}^3$]
- ρ_{N_2} ... hustota dusíku [$kg/m_{N,pal}^3$]
- ρ_{H_2O} ... hustota vodní páry [$kg/m_{N,pal}^3$]
- O_{CO_2} ... množství oxidu uhličitého ve spalinách [$m_{N,CO_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- O_{N_2} ... množství dusíku ve spalinách [$m_{N,N_2}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{H_2O}^S$... objem vodní páry ve spalinách [$m_{N,H_2O}^3/m_{N,pal}^3$]
- $O_{SV,min}$... minimální objem vlhkých spalin [$m_{N,sp}^3/m_{N,pal}^3$]

Hustota skutečných spalin

$$\rho_{SV} = \frac{O_{SV,min} \cdot \rho_{SV,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV,min} \cdot \rho_{VV}}{O_{SV,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV,min}} \quad (25)$$

$$\rho_{SV} = \frac{10,7530 \cdot 1,2298 + (1,15 - 1) \cdot 9,8324 \cdot 1,2851}{10,7530 + (1,15 - 1) \cdot 9,8324}$$

$$\rho_{SV} = 1,2365 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

- $O_{SV,min}$... minimální objem vlhkých spalin [$m_{N,sp}^3/m_{N,pal}^3$]
- $\rho_{SV,min}$... hustota spalin [$kg/m_{N,pal}^3$]
- α ... přebytek spalovacího vzduchu [–]
- $O_{VV,min}$... minimální objem vlhkého vzduchu [$m_{N,vz}^3/m_{N,pal}^3$]
- ρ_{VV} ... hustota vlhkého vzduchu [$kg/m_{N,pal}^3$]

Entalpie vzduchu a spalin

Měrné entalpie složek

$$i_{VS} = 119 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

$$i_{CO_2} = 152,9 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

$$i_{N_2} = 116,6 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

$$i_{H_2O} = 135,7 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

$$i_{O_2} = 121,8 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

Entalpie spalin

$$I_{s,min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O}^S \cdot i_{H_2O} \quad (26)$$

$$I_{s,min}^t = 1,0235 \cdot 152,9 + 7,5584 \cdot 116,6 + 2,1711 \cdot 135,7$$

$$I_{s,min}^t = 1332,42 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

$$I_{v,min}^t = O_{VS,min} \cdot i_{VS} + O_{H_2O}^V \cdot i_{H_2O} \quad (27)$$

$$I_{v,min}^t = 9,6775 \cdot 119 + 0,1548 \cdot 135,7$$

$$I_{v,min}^t = 1172,64 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

$$I_s^{t,\alpha} = I_{s,min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{v,min}^t \quad (28)$$

$$I_s^{t,\alpha} = 1332,42 + (1,15 - 1) \cdot 1172,64$$

$$I_s^{t,\alpha} = 1508,32 \frac{kJ}{m_{N,pal}^3}$$

Tepelné kapacity spalin

Měrné tepelné kapacity pro teplotu 90°C byly určeny lineární interpolací z tabulky 4-7 literatury [2]

$t [^{\circ}\text{C}]$	$c_p [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$					
	O_2	N_2	CO_2	CO	SO_2	vodní pára
0	1,3039	1,2949	1,6007	1,3012	1,7792	1,4933
100	1,3193	1,2951	1,6996	1,3021	1,8631	1,5062
200	1,3372	1,2994	1,7863	1,3105	1,9427	1,5227
300	1,3567	1,3069	1,8626	1,3188	2,0010	1,5425
400	1,3767	1,3167	1,9298	1,3314	2,0725	1,5648
500	1,3965	1,3281	1,9892	1,3440	2,1227	1,5891

$$c_{p,x} = \frac{c_{px100} - c_{px0}}{100} \cdot 10 - c_{px100} \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (29)$$

Kapacity složek

$$c_{p,\text{CO}_2} = \frac{1,6996 - 1,6007}{100} \cdot 10 - 1,6996 = \mathbf{1,68971 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$c_{p,\text{O}_2} = \frac{1,3193 - 1,3039}{100} \cdot 10 - 1,3193 = \mathbf{1,31776 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$c_{p,\text{N}_2} = \frac{1,2951 - 1,2949}{100} \cdot 10 - 1,2951 = \mathbf{1,29608 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$c_{p,\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,5062 - 1,4933}{100} \cdot 10 - 1,5062 = \mathbf{1,50491 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Kapacita spalín

$$c_{p,S} = c_{p,\text{CO}_2} \cdot x_{\text{CO}_2,\alpha} + c_{p,\text{O}_2} \cdot x_{\text{O}_2,\alpha} + c_{p,\text{N}_2} \cdot x_{\text{N}_2,\alpha} + c_{p,\text{H}_2\text{O}} \cdot x_{\text{H}_2\text{O},\alpha} \quad (30)$$

$$c_{p,S} = 1,68971 \cdot 0,0837 + 1,31776 \cdot 0,0249 + 1,29608 \cdot 0,7108 + 1,50491 \cdot 0,1795$$

$$c_{p,S} = \mathbf{1,36565 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Účinnost

Ztráty chemickým nedopalem

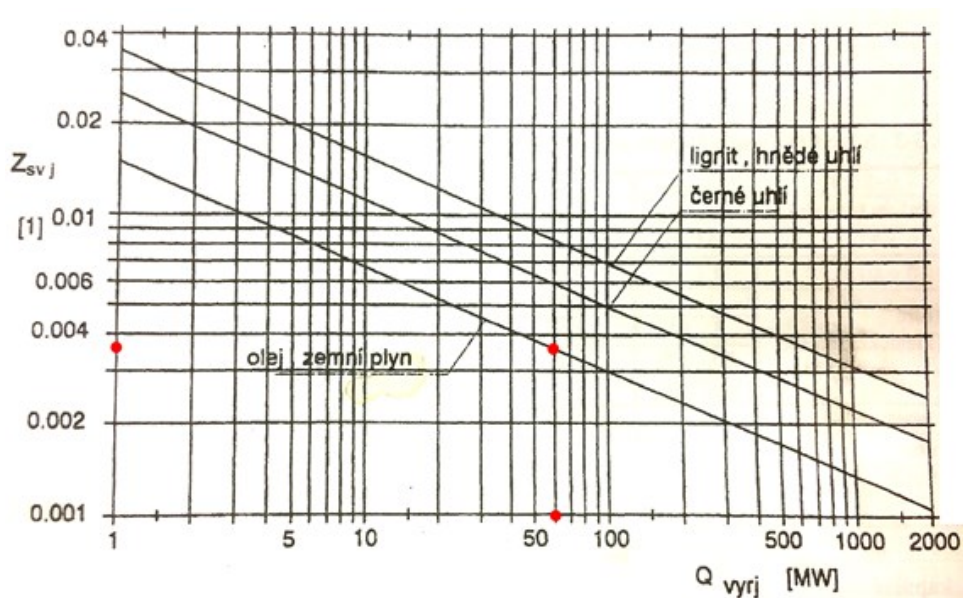
$$Z_{\text{CO}} = \frac{0,2116 \cdot mg_{\text{CO}} \cdot O_{ss,min}}{(21 - O_{2,ref}) \cdot Q_i} \quad (31)$$

$$Z_{\text{CO}} = \frac{0,2116 \cdot 100 \cdot 8,5819}{(21 - 3) \cdot 35\,880}$$

$$Z_{\text{CO}} = \mathbf{0,028 \%}$$

Ztráty sáláním a vedením tepla do okolí

Z diagramu 5-1 v literatuře [2] jsem určil hodnotu $Z_{SV} = \mathbf{0,0036 \%}$



Obrázek č.

Ztráta citelným teplem spalín – komínová

$$Z_K = \frac{O_{SV} \cdot c_{p,S} \cdot (t_S - t_o)}{Q_i} = \frac{12,2279 \cdot 1,3657 \cdot (90 - 20)}{35\,880} = 3,2579 \% \quad (32)$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - Z_{CO} - Z_{SV} - Z_K = 1 - 0,0280 - 0,0036 - 3,2579 = 96,3540 \% \quad (33)$$

Výrobní teplo a množství paliva

Entalpie páry a vody

$$i_{pp} = 3355 \frac{kJ}{m_N^3}$$

$$i_{nv} = 617 \frac{kJ}{m_N^3}$$

$$i_{sk} = 1386 \frac{kJ}{m_N^3}$$

Výrobní teplo

$$Q_{V\acute{y}r} = \dot{m}_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + \dot{m}_{od} \cdot (i_{sk} - i_{nv}) \quad (34)$$

$$Q_{V\acute{y}r} = 16,67 \cdot (3355 - 617) + 0,5 \cdot (1386 - 617)$$

$$Q_{V\acute{y}r} = 46015 \text{ kW}$$

3 Návrh rekonstrukce spalínového traktu

3.1 Návrh spalínového kanálu

Podle mého názoru a po konzultaci s provozovatelem nemá smysl provozovat plynofikovaný kotle s původním elektrofiltrem spalín. Stávající filtr není ideálně těsný a při provozu na plyn by dále korodoval a způsoboval přisávání falešného vzduchu. Proto bylo navrženo zlikvidovat stávající filtr spalín a nahradit tento filtr spalínovým kanálem dimenzovaným na menší množství spalín z titulu omezení výkonu kotle ze 100 tun páry za hodinu na 60 tun páry za hodinu.

Stávající spalínový trakt od výstupu z výsypky LUWO po napojení na komín bude demontován. Stávající filtr, který při provozu na plyn není v provozu a kouřový ventilátor bude nahrazen novým spalínovým kanálem a novým kouřovým ventilátorem.

Rozměry nového spalínového kanálu byly přizpůsobeny zmenšenému množství spalín a mírně zvýšené rychlosti spali oproti původnímu spalování uhlí.

Průtočná plocha nového spalínového kanálu: 1,3 x 1,2 m (1,56 m²) při střední rychlosti spalín v novém spalínovém potrubí 15 m/s při výkonu kotle 60 t/h páry.

Výpočtové měrné množství spalín při jmenovitém výkonu kotle

$$O_{SV} = O_{SV,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV,min} = 10,7530 + (1,15 - 1) \cdot 9,8324 = 12,2279 \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Parametry spalín pro výpočet tlakových ztrát a návrh ventilátoru.

Teplota spalín je stanovena podle obvyklých parametrů dosahovaných při spalování zemního plynu při výkonu kotle 60 t/h a čistých výhřevných plochách.

$$t_s = 90^\circ\text{C}$$

Jedná se o absolutní tlak pro výpočet a návrh ventilátoru. Předpokládaný podtlak v sání ventilátoru bude – 1500 Pa

$$p_s = 98\,000 \text{ Pa}_{(a)}$$

Hustota spalín v normálním stavu

$$\rho_{SV} = 1,2365 \frac{kg}{m_{N,pal}^3}$$

Hustota spalín v efektivním stavu

$$\rho_{SV,ef} = 0,899 \frac{kg}{m^3}$$

3.2 Aerodynamický výpočet spalínového traktu

Množství spalovaného plynu při jm. výkonu

$$M_{pal} = \frac{Q_{výr}}{Q_i \cdot \eta_k} \quad (35)$$

$$M_{pal} = \frac{46015}{35\,880 \cdot 0,963}$$

$$M_{pal} = 1,331 \frac{m^3}{s}$$

Výpočtové skutečné množství spalín

$$\dot{V}_{spal,skut} = M_{pal} \cdot O_{sv} = 1,331 \cdot 12,2279 = 16,275 \frac{m_N^3}{s} \quad (36)$$

Efektivní množství paliva

$$\dot{V}_{ef} = \dot{V}_{spal,skut} \cdot \frac{T_s}{T_n} \cdot \frac{p_n}{p_s} = 16,275 \cdot \frac{365}{273} \cdot \frac{101\,325}{98\,000} = 22,375 \frac{m^3}{s} \quad (37)$$

Určení hydraulického průměru

$$d_{hydr} = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 1,3}{5} = 1,248 \, m \quad (38)$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w \cdot d_{hydr}}{\nu} = \frac{15 \cdot 1,248}{19,14 \cdot 10^{-6}} = 652\,000 \quad (39)$$

Součinitel

$$\lambda = 0,857 \cdot (tg \, Re)^{-2,4} = 0,03 \quad (40)$$

Tlaková ztráta třením spalín o stěny výtlačného potrubí

$$\Delta p_{tře,výtlak} = \lambda \cdot \frac{L}{d_{hydr}} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 0,03 \cdot \frac{37}{1,248} \cdot \frac{15^2}{2} \cdot 0,899 = 89,9 \, Pa \quad (41)$$

Místní ztráty výtlačného potrubí

$$\Delta p_{\text{místní,výtlač}} = n_{\text{kolen,výtlač}} \cdot \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 0,2 \cdot \frac{15^2}{2} \cdot 0,899 = 20 \text{ Pa} \quad (42)$$

Celková tlaková ztráta spalínového potrubí na výtlačku ventilátoru

$$\Delta p_{c,\text{výtlač}} = \Delta p_{\text{třením}} + n_{\text{kolen}} \cdot \Delta p_{\text{místní}} = 89,9 + 7 \cdot 20 = 229,9 \text{ Pa} \quad (43)$$

Tlaková ztráta třením spalin o stěny sacího

$$\Delta p_{\text{tře,sání}} = \lambda \cdot \frac{L}{d_{\text{hydr}}} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 0,03 \cdot \frac{10}{1,248} \cdot \frac{15^2}{2} \cdot 0,899 = 24 \text{ Pa} \quad (44)$$

Místní ztráty sacího potrubí

$$\Delta p_{\text{místní,sání}} = n_{\text{kolen,sání}} \cdot \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 0,2 \cdot \frac{15^2}{2} \cdot 0,899 = 20 \text{ Pa} \quad (45)$$

Celková tlaková ztráta spalínového potrubí na sání ventilátoru

$$\Delta p_{c,\text{sání}} = \Delta p_{\text{tře,sání}} + n_{\text{kolen}} \cdot \Delta p_{\text{místní,sání}} = 24 + 3 \cdot 20 = 84 \text{ Pa} \quad (46)$$

Celková tlaková ztráta spalínového potrubí

$$\Delta p_c = \Delta p_{c,\text{výtlač}} + \Delta p_{c,\text{sání}} = 229,9 + 84 = 313,9 \text{ Pa} \quad (47)$$

% výkonu	Provozní stav	Tlaková ztráta trasy celková [Pa]		Rychlost v potrubí [m/s]
		sání (LUVO výstup - KV)	výtlač (KV - komín)	
24	najíždění	50	12	3,9
33	20 t/h	93	50	6
80	48 t/h	336	262	13
100	60 t/h	514	417	15,7
110	66 t/h	890	754	20,7

Tabulka č. 1: Přehled výsledků výpočtu tahových ztrát pro definované provozní stavy

Ventilátor bude vybaven mazáním, chladicími a těsnicími ventilátory, kompenzátory na vstupu a výstupu, monitory provozu, indikátory vibrací - ložisek hlavních a elektromotoru, obslužnými plošinami, pro manipulaci s motorem.

Navržený ventilátor by měl být radiální. Požadovaná minimální účinnost při minimálním výkonu 20t/h by měla být větší než 70%. Příkon a typ pohonu i frekvenční měnič je záležitostí výrobce ventilátoru.

Dle informace z provozu na kotli K2 není prováděno kontinuální měření podtlaku za LUWO, aby bylo možné stanovit celkové tlakové navýšení kouřového ventilátoru pro navrhovaný nový spalinový kanál jsem provedl jednorázové měření.

Na základě dostupných dat je možno uvažovat s ventilátorem, který bude schopný pokrýt tlakové rozpětí minimálně cca. 300 – 2000Pa pro vypočtené průtoky média v uvažovaných provozních stavech.

% výkonu	Provozní stav	Teplota	Průtok	Hustota
		[°C]	[Nm ³ /s]	[kg/m ³]
24	najíždění	90	4,43	0,9366
33	20 t/h	90	6,83	0,9364
80	48 t/h	90	14,22	0,9331
100	60 t/h	90	17,77	0,9329
110	66 t/h	90	19,55	0,9327

Klimatické podmínky:

Nadmořská výška	do 1000 m nad mořem
Barometrický tlak	98,059 kPa
Teplota během roku	-30 °C až + 40 °C
Relativní vlhkost vzduchu	cca 75%
Mimořádné zatížení - zemětřesení	ne

4 Parametry kouřového ventilátoru

Motory

Přednostně je vyžadováno použití asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Motory musí být dimenzovány pro trvalý provoz a spouštění přímým připojením k síti. Motory musí mít krytí minimálně IP54, svorkovnice IP55.

Izolace musí být provedena ve třídě F, ale motory budou provozovány ve třídě B. Motory musí dát plný výkon i při snížení jmenovitého napětí až na 85% U_n po dobu cca. 1 hodiny. Motory musí zaručit najetí až do 80 % U_n a nesmí vypadnout až do 70 % U_n . Motory musí zaručit možnost připojení i při 100 % fázové opozici. Při dimenzování motorů je třeba počítat s rezervou minimálně 10 % ve srovnání s žádaným výkonem na hřídeli. Motory, které mají být připojeny na zemní síť, musí být vybaveny zemní svorkou. Elektromotory o výkonu 75 kW a vyšším budou vybaveny tepelnou ochranou ve vinutí. Pohyblivé elektrické napájení bude vždy součástí napájeného zařízení.

NN Motory musí mít ložiska s kontinuálním mazáním.

VN Motory musí umožnit dvě po sobě jdoucí najetí ze studeného stavu. Po následném jednohodinovém trvalém provozu na jmenovitém výkonu musí být opět přípustná dvě najetí. Motory musí být dimenzovány tak, aby při jmenovité frekvenci a $110\% U_n$ pracovaly bez závad. Záběrný proud musí být roven nebo nižší než 5,5 násobku jmenovitého proudu. Kluzná ložiska musí být vybaveny ukazateli stavu oleje. Všechny motory musí být vybaveny vyhříváním pro dobu odstávky.

Motory s chlazením vzduch-voda budou vybaveny vždy jedním ukazovacím kontaktním teploměrem pro teplý a studený vzduch, které budou vyvedeny na svorky. Hlídní motorů bude provedeno pomocí 6 ks teploměrů v drážkách a 2 ks ložiskových teploměrů. Všechny teploměry budou připojeny na svorky ve společné svorkovnici.

Svorky

Při dimenzování svorek je třeba počítat s tím, že připojované kabely budou z tepelných důvodů větších průřezů. Kabely musí být dimenzovány minimálně na 1,7 násobek jmenovitého proudu.

Všechny potřebné úrovně napětí musí být hlídány ihned za napájecími svorkami event. za hlavním spínačem ve skříní pomocí fázového vypínacího relé. Kontakty relé (při výpadku sepnuto) musí být prodrátovány na svorkovnici.

Všechna potřebná ovládací napětí musí být jištěna automatickými ochranami s pomocnými kontakty. Ovládání je provedeno zajištěným napájením 220 V=, které má dva přívody s diodovým záskokem. Hlídní napájení bude provedeno před diodami na straně kabelu.

Oceloplechové skříně šedé barvy, jednostranné či dvoustranné s měděnými sběrnami a krytím IP. Skříně budou označeny kódem KKS a na dveřích každého pole rozvaděče bude seznam vývodů.

Všechny měřicí přístroje proudu určené pro přístroje, trafo a motory, které jsou dimenzovány na pevný jmenovitý výkon, musí být opatřeny červenou značkou u hodnoty jmenovitého proudu a stupnicí min. až do 1,25 násobku jmenovitého proudu v ampérech. Motorové spotřebiče musí být opatřeny stupnicí přetížení.

Pro pozdější rozšíření musí být ve všech rozvaděcích a ovládacích skříních prostorová rezerva 20 %.

Vibrace

Vibrace ložisek Kouřového ventilátoru a elektromotoru budou snímány snímači absolutních vibrací. Snímače by měly být umístěny v horizontálním, vertikálním a axiálním směru vibrací. Signály ze snímačů budou přenášeny do centrálního řídicího systému. Snímače absolutních vibrací budou upevněny šrouby na vytipovaných místech hlavních ložisek ventilátoru a pohonného elektromotoru. Přesné umístění snímačů by měl zhodnotit vybraný dodavatel ventilátoru.

Signálové kabely povedou od snímačů do sdružovacích boxů v ochranných hadicích dle provedení konkrétního dodavatele instrumentace. Sdružovací boxy budou umístěny v blízkosti soustrojí.

Způsob napájení snímačů záleží na výběru konkrétní instrumentace.

V prostoru KV musí být použity typy snímačů odolávající provozní teplotě až 250°C.

Požadovaný rozsah měřených absolutních hodnot vibrací:

- | | |
|---|--------------|
| - vibrace ložisek pohonného el. motoru KV | 0 až 10 mm/s |
| - vibrace hlavních ložisek KV | 0 až 10 mm/s |

Hodnoty pro návrh ventilátoru

Potřebné hodnoty kouřového ventilátoru jsou vztaženy ke spalování ZP při jmenovitém výkonu kotle

průtok spalin při jmenovitém výkonu:	17,77 Nm ³ /s
teplota spalin	90 °C
tlakový spád celkový	cca. 1500 Pa
rozsah průtoků spalin	4,43 až 19,55 Nm ³ /s (T= 90°C)

Původní KV stojící na prostranství v blízkosti komínu bude zrušen a nahrazen novým KV podle návrhu a umístěným v přístavku kotle K2 vedle VV. Původní VV v přístavku bude zrušen a nahrazen novým VV. Osa nového VV bude pootočená o 90° a tím vznikne v přístavku prostor pro umístění nového KV.

Vzduchový ventilátor

Je navržen nový vzduchový ventilátor RVK1600-4N. Specifikace ventilátoru je uvedena v kapitole 4.8. Jedná se o ventilátor se spojkou, letmo uloženým kolem, rámem motoru a ložisky uloženými na betonovém podstavci. Motor Siemens 315S-IE2 75 kW s otáčkami 988 /min. Motor je napájen frekvenčním měničem (frekvenční měnič bude použit dle požadavku zákazníka). Nový VV bude umístěn v přístavku kotle K2 mezi osami sloupů 3 a 4 s podélnou osou kolmo ke stěně kotelní.

Návrhový bod ventilátoru

Celkový tlak ventilátoru	3 100 Pa
Množství vzduchu	16,4 Nm ³ /s
Teplota vzduchu	20 °C

Stávající svislý sací kanál VV o průřezu 2000 x 2000 mm bude nad úrovní +7,500 demontován a znovu napojen na sací hrdlo VV. Mezi sacím hrdlem VV a kanálem umístit tkaninový nebo pryžový kompenzátor, aby se nepřenášelo chvění do systému. Kanál bude vyroben z plechu tl. 4 mm, materiál S235JR. Kanál bude netřen základním a vrchním ochranným nátěrem.

Stávající výtlačný kónický kanál VV v místě napojení na vodorovný kanál na úrovni +5,500 bude demontován a znovu napojen na výtlačné hrdlo VV kanálem o průřezu 900 x 1800 mm. Mezi výtlačným hrdlem VV a kanálem by měl být umístěn tkaninový nebo pryžový kompenzátor, aby se nepřenášelo chvění do systému. Kanál bude vyroben z plechu tl. 4 mm, materiál S235JR. Kanál bude natřen základním a vrchním ochranným nátěrem.

Nepoužívaná část vzduchových kanálů na výtlačku směrem ke sloupové řadě 3 bude odstraněna a vodorovný kanál za napojením VV zaslepen v průřezu 1800 x 2000

mm. Stejně tak bude odstraněn bypass mezi sáním a výtlakem VV na úrovni +6,000 a vzniklé otvory zaslepeny.

Stávající potrubí v přístavku je nutno upravit nebo zrušit, aby nedošlo ke kolizi s nově instalovaným zařízením a novými kanály

Kouřový ventilátor

Je navržen nový kouřový ventilátor RVK 2000-SN. Specifikace ventilátoru je v kapitole 4.8. Jedná se o ventilátor se spojkou, letmo uloženým kolem, rámem motoru a ložisky uloženými na betonovém podstavci. Motor Siemens 315L-IE2 132 kW s otáčkami 760 /min. Motor je napájen frekvenčním měničem (frekvenční měnič bude použit dle požadavku zákazníka). Nový KV bude umístěn v přístavku kotle K2 mezi osami sloupů 2 a 3 s podélnou osou kolmo ke stěně kotelny.

Stávající spalínový kanál bude od výstupu z luva (průřez 1000 x 5000 mm, výšková úroveň +11,600) po elektrostatický odlučovač odstraněn. Demontován bude i elektrostatický odlučovač a výstupní spalínový kanál ke komínu až po koleno 90° 2000 x 2000 mm cca 10 metrů od komína včetně původního KV stojícího na prostranství v blízkosti komínu.

Od výstupu z luva pak bude instalován nový spalínový kanál a napojen na sací hrdlo KV. Z prostorových důvodů bude kanál proměnného průřezu. Nejdelší část bude mít průměr Ø 1400 mm. Mezi sacím hrdlem VV a kanálem by měl být umístěn tkaninový kompenzátor, aby se nepřenášelo chvění do systému a také z dilatačních důvodů. Kvůli dilataci spalínových kanálů by měl být další kompenzátor na trase v blízkosti luva. Sací kanál KV bude podepřen u kolena před sacím hrdlem KV do podlaží +0,0m. Další podpěra bude na konstrukci ve výšce cca +8,00m. Kanály budou z plechu tl. 6 mm, materiálu S235JR, budou natřeny základním nátěrem a zaizolovány měkkou izolací a překrytý pozinkovaným plechem.

Od výstupního hrdla nového KV bude namontován nový spalínový kanál a napojen na stávající koleno 90° 2000 x 2000 mm cca 10 metrů od komínu. Od výstupního hrdla KV povede kanál svisle vzhůru na úroveň cca +8,20m. V této výšce kanál překlene komunikaci a bude podepřen na stávající ocelové konstrukci po demontovaném stávajícím spalínovém kanálu vedoucím k elektrostatickému odlučovači. Dále bude veden v místech po stávajícím odlučovači v úrovni cca +7,70m až k místu napojení kanálu u komína. Kanál bude mít průměr Ø 1400 mm. Bude podepřen na ocelové konstrukci, z větší části ponechané po demontáži stávajících spalínových kanálů a elektrostatického odlučovače. Mezi sacím hrdlem VV a kanálem by měl být umístěn tkaninový kompenzátor, aby se nepřenášelo chvění do systému a také z dilatačních důvodů. Kvůli dilataci spalínových kanálů by měly být další dva kompenzátory na trase směrem ke komínu. Na výtlačku KV budou umístěny klapky s elektropohonem, jedna

klapka bude umístěna v přístavku za ventilátorem, druhá na kanálu před vstupem do komína. Ve vodorovné části kanálu bude umístěna měřicí dýza. Kanály budou z plechu tl. 6 mm, materiálu S235JR, budou natřeny základním nátěrem a zaizolovány měkkou izolací a překrytý pozinkovaným plechem.

Rozměry nového spalínového kanálu respektují maximální objemový průtok spalin z kotle. Průtočná plocha nového spalínového kanálu je 1,54 m² (průměr 1,4 m).

Návrhový bod ventilátoru

Celkový tlak ventilátoru	2 700 Pa
Množství spalin	22 Nm ³ /s
Teplota spalin	90 °C
Teplota pro materiálové dimenzování KV	150 °C

Objemové složení spalin:

N ₂	71,14 %
O ₂	3,60 %
H ₂ O	17,46 %
CO ₂	7,80 %
SO ₂	0,00 %

Specifikace navržených ventilátorů

Ventilátory RVK jsou radiální vysokotlaké ventilátory jednostranně sací, velikosti 1600, 2000. Jsou poháněny elektromotory přes pružnou spojku. Oběžné kolo ventilátoru je upevněno letmo na kuželovém konci hřídele. Pro zajištění širokého rozsahu výkonu je možné u každé velikosti použít osm různých oběžných kol, kola č. 1, až 8.

Ventilátory se vyrábí v normálním a pancéřovaném provedení. Pancéřované provedení má zesílené oběžné kolo a vyměnitelnou vložku obvodového plechu spirální skříně. K přesnějšímu dosažení požadovaného průtoku je každý ventilátor vybaven vstupním regulačním ústrojím, ovládaným servomotorem (servomotor s táhlem není v rozsahu dodávky ventilátoru, v případě požadavku nutno uvést v objednávce).

Hřídel ventilátoru je uložen ve valivých ložiskách v dělených, samostatných ložiskových tělesech. Při teplotě dopravované vzdušiny nad +1000C se hřídel chladí chladícím kotoučem, umístěným mezi spirální skříň a volné ložisko. Ventilátory dopravující vzdušiny s teplotami +2500C až +4000C se chladí chladícím kotoučem a oběhovým mazáním ložisek. Ložisková tělesa jsou opatřena kontaktními teploměry.

Spirální skříň je svařovaná. V obvodovém plechu na straně výtaku je umístěn průlez. V nejnižším místě spirální skříně je odvodnění. Díly ventilátoru jsou uloženy na dvou rámech, z nichž je jeden kotvený na vodorovnou betonovou podlahu a druhý na betonový blok, vyvýšený nad úroveň podlahy. Po dohodě s výrobcem ventilátorů lze dodat ventilátor v atypickém provedení s pružným uložením na ocelové stoličce.

Použití Ventilátory normálního provedení se používají pro dopravu čisté nebo jemným prachem znečištěné vzdušiny, ventilátory pancéřovaného provedení pro dopravu vzdušin s abrazivními příměsemi. Ventilátory nelze použít pro dopravu vzdušin výbušných, s korozivním charakterem, obsahujících vláknitý prach a vzdušin s příměsemi, které by mohly způsobit zalepování. Ventilátory nejsou plynotěsné a nelze je použít pro dopravu vzdušin škodlivých a zapáchajících.

Pracovní podmínky.

Ventilátory mohou dopravovat vzdušiny o teplotách -200°C až $+4000^{\circ}\text{C}$. Každý ventilátor je možné provozovat jen ve výrobcem potvrzených parametrech, udaných též na štítku ventilátoru. Výkon pro setrvalý provozní stav je možné měnit regulačním ústrojím v rozsahu min. 60 % celkové účinnosti ventilátoru, popřípadě v provozně ověřeném rozmezí. Provozování každého ventilátoru je omezeno hodnotami mechanického kmitání podle ČSN 12 2011.

Ventilátory vyhovují pro dopravu vzdušin a umístění v prostředí bez nebezpečí výbuchu podle ČSNEN 60079-10 při teplotě okolí -200°C až $+350^{\circ}\text{C}$. Při teplotě dopravované vzdušiny do $+2500^{\circ}\text{C}$ může být teplota okolí až $+400^{\circ}\text{C}$.

Při umístění ventilátoru ve venkovních prostorách musí být elektromotory chráněny stříškami před přímým slunečním zářením, deštěm a zapadáním sněhem. Stříška na motor se na požadavek dodává jako příslušenství.

5 Posouzení teploty spalin za kotlem

Z naměřených teplot vychází rosný bod 65°C . Na ventilátoru dojde k zahřátí o 5°C . Za ventilátorem tedy bude teplota 95°C jestliže na vrcholu komína má být 65°C stupňů, rozdíl teplot na zchlazení je tedy 30°C .

Varianty řešení:

- Předehřev spalovacího vzduchu parou
- Předehřev spalovacího vzduchu recirkulací ohřátého vzduchu z ohříváku vzduchu LUVU zpět do sání vzduchového ventilátoru
- Předehřev kotle při startu cizí parou
- Obtok ohříváku vzduchu LUVU (při startu)
- Rychlé překonání oblasti rosného bodu spalin

Nízkoteplotní koroze

Předeheřev vzduchu parním výměníkem pro zabránění podkročení rosného bodu aby byla teplota za kotlem pořád 90°C.

Závěr

Seznam použité literatury

- [1] Místní provozní řád plynového kotle K2. Paskov, 2016.
PŘÍLOHA A - MPŘ+4006+kotel+K2.docx
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha , ČVUT, 2007. 212 s. Třetí vydání. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [3] ČERNÝ, Václav a spol. *Parní kotle a spalovací zařízení*. Praha, SNTL, 1975
528 s. Vydání 1.
- [4]

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

1. PŘÍLOHA A – MPŘ 4006 kotel K2.docx

Poděkování